



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

KATEDRA TEXTILNÍCH A JEDNOÚČELOVÝCH STROJŮ

2011

Petr Grimm

Studijní program B2341-Strojírenství

Stavba strojů

Konstrukce laboratorního přístroje pro molekulární diagnostiku

**Construction of laboratory equipment for molecular
diagnostics**

KTS-B030

Vedoucí bakalářské práce:

Prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Jozef Kaniok, Ph.D.

Rozsah práce a příloh

Počet stran 31

Počet tabulek 2

Počet obrázků 27

Počet příloh 5

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 3.1. 2011

Podpis:

.....
Petr Grimm

Poděkování

Předně bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Jaroslavu Beranovi, CSc. za cenné rady a odborné vedení a celému zastoupení Katedry textilních a jednoúčelových strojů. V neposlední řadě děkuji mé rodině za trpělivost a podporu po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem rotoru experimentální centrifugy pro laboratorní diagnostiku, s motivem navrhnout rotor, tak aby mohla být využita více-segmentová kyveta (zkumavka) a zajistila se tak automatizace diagnostického procesu. Vzhledem k požadovanému vysokému zatížení rotoru odstředivou silou je vývoj doprovázen kontrolními výpočty v programu Pro/Mechanica. Závěr práce se zabývá návrhem pohonné jednotky zajišťující rotační pohyb, s ohledem na dostatečné zrychlení rotoru a dosažení vysokých otáček.

Klíčová slova

navrhnout, rotor, zatížení, kontrolní výpočty, zrychlení

Abstract

This bachelor project is concerned in designing a laboratory diagnostics centrifuge rotor, with the intention to design the rotor in a way that a multiple-segment cuvette could be utilized, this ensuring the diagnostic process automation. With regard to the demanded high rotor centrifugal force load the development is accompanied with checking calculations using the Pro/Mechanica program. The thesis epilogue is concerned in designing a traction unit ensuring rotary movement, with regard to sufficient rotor acceleration and reaching higher rotation speed.

Key words

designing, rotor, force load, checking calculations, acceleration

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Obecný úvod do problematiky centrifug.....	9
2.1 Centrifugace.....	9
2.1.1 Preparativní centrifugace.....	10
2.1.2 Analytická centrifugace.....	11
2.2 Centrifugy.....	12
2.2.1 Rozdělení centrifug.....	13
3. Návrh konstrukce rotoru.....	18
3.1 Pracovní cyklus rotoru.....	18
3.2 Geometrie rotoru.....	18
3.3 Pevnostní analýza rotoru.....	20
3.4 Kontaktní úloha.....	22
3.5 Modální analýza rotoru.....	23
3.5.1 Výpočtový model.....	24
3.5.2 Vlastní frekvence a tvary soustavy.....	25
4. Návrh a výpočet pohonu.....	27
5. Koncepce uložení rotorové soustavy.....	28
6. Závěr.....	29
Použitá literatura.....	30
Seznam příloh.....	31

Seznam použitých zkratek a symbolů

SYMBOL	POPIS	JEDNOTKA
RCF	relativní odstředivé zrychlení	g
rpm	otáčky za minutu	ot. /min
r	poloměr	cm
f	přepočítávací faktor	[-]
L	délka	mm
Ω	vlastní frekvence	Hz
k	tuhost	N/m
n_k	kritické otáčky	ot. /min
n	otáčky	ot. /min
Mn	nominální moment	Nm
I	moment setrvačnosti	kg.
ω	úhlová rychlost	rad s ⁻¹
α	úhlové zrychlení	rad s ⁻²
t	čas	s

1. Úvod

Práce se zabývá konstrukcí části přístroje pro molekulární diagnostiku, jenž je v dnešní době nepostradatelnou součástí farmaceutického průmyslu, lékařských diagnostických metod a mnoha vědních disciplín, jako je molekulární biologie a chemie. Jedná se o centrifugu, kterou vyvíjí katedra textilních a jednoúčelových strojů. Na základě požadovaných vlastností, dochází k vývoji prototypu, jenž má automatizovat úkony, které do dnešní doby zastávala lidská obsluha. Tak jako ve většině dnešních průmyslových odvětví je snahou co nejvíce zefektivnit výrobu, v tomto případě diagnostické, kapacity, a tím zvyšovat produktivitu práce a snižovat potřebu lidské obsluhy. Jednotlivé kapitoly se budou snažit vysvětlit postupně základní pojmy týkající se části molekulární diagnostiky ovlivňující konstrukci rotoru, následný vývoj konstrukce rotoru, metody použité pro konstrukci a na závěr práce návrh pohonu centrifugy a jeho uložení.

2. Obecný úvod do problematiky centrifug

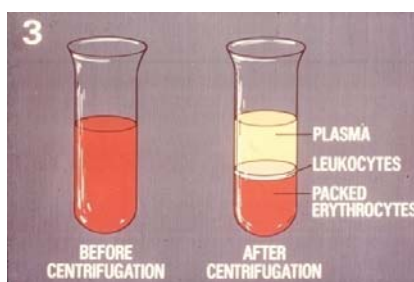
Centrifuga neboli odstředivka je zařízení využívající rotačního pohybu kolem osy, na určitém poloměru ramene, jehož důsledkem je vyvození odstředivé síly, působící na předmět vložený do rotoru centrifugy. Vyvozená odstředivá síla je využívána k oddělení různě těžkých frakcí (částí), jenž jsou obsaženy v kapalině, či plynu. Může se jednat o kapaliny či plyny o různé měrné hustotě, či pevné částice v plynech a kapalinách obsažených. Využití principu tohoto zařízení, nalezneme, jak v domácnosti ve formě např. odšťavňovače, v potravinářském průmyslu při oddělení smetany od mléka, v jaderném průmyslu pro separaci uranu, nebo obohacování jaderného paliva.

Obecně o tomto principu hovoříme, jako o odstřeďování neboli o centrifugaci a jedná se o jednoduchou a nejčastěji využívanou laboratorní metodu. Ve zdravotnických zařízeních se využívá, např. k sedimentaci krve, či separaci DNA.

2.1 Centrifugace

Jedná se o laboratorní metodu oddělující fáze roztoku, jak kapalně plynné či pevné. Oddělení fází probíhá na základě hustoty a viskozity pro kapalně a plynné směsi roztoků, pro suspenze pevných a kapalných fází na základě hustoty, velikostí a tvarů pevných částic, viskozitě a hustotě kapalného média toto platí i u aerosolu.

Můžeme hovořit o urychlení přirozené sedimentace, způsobené gravitačním zrychlením, pomocí působící odstředivé síly vlivem otáčení rotoru. Mluvíme-li o sedimentaci obecně, jedná se o proces, kdy dochází k usazování těžších, nerozpustných součástí plyných, či kapalných směsí. Například krev můžeme považovat za suspenzi červených krvinek (latinsky erytrocyt), v roztoku krevní plazmy.



Obr.1 [2]

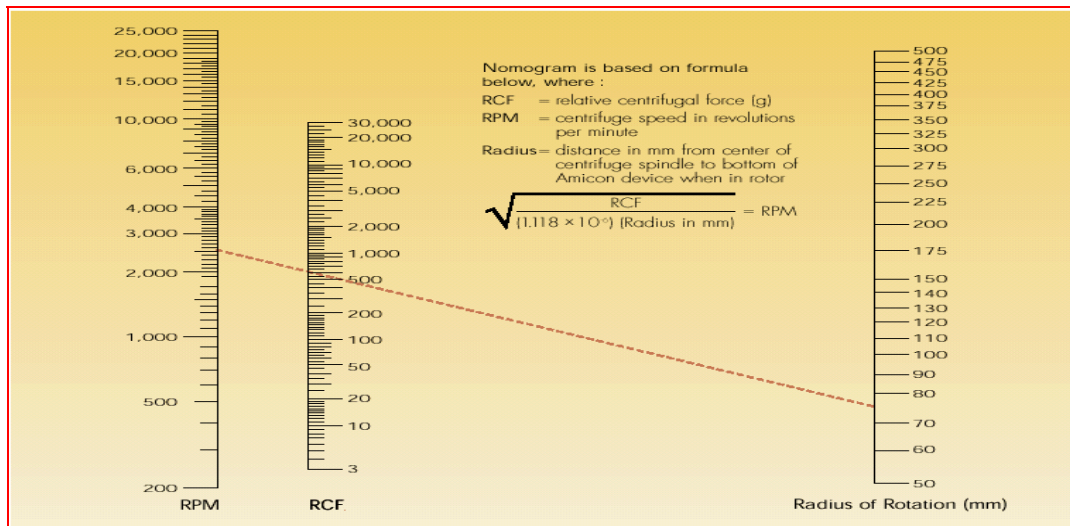
Vzhledem k tomu, že centrifugace urychluje přirozenou sedimentaci způsobenou gravitačním zrychlením zavádíme relativní odstředivé zrychlení (RCF), s jednotkou g, které nám názorně udává kolikrát je zrychlení centrifugy větší, nežli normální tíhové zrychlení.

$$RCF = f \times r \times (\text{rpm})^2 \quad (2.1)$$

f – přepočítávací faktor – $1,118 \cdot 10^{-5}$

r – poloměr rotoru centrifugy (cm)

rpm – otáčky za minutu

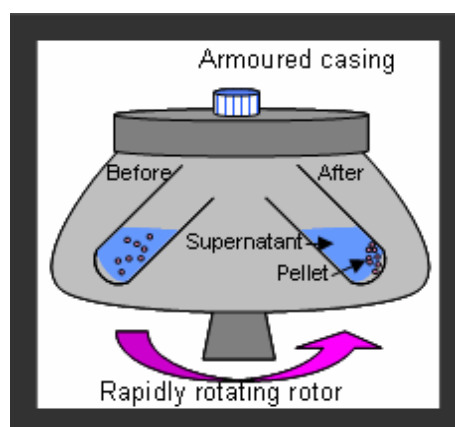


Obr.2 Nomogram pro přepočet RPM na RCF[1]

Typy centrifugací používaných v molekulární biologii

2.1.1 Preparativní centrifugace

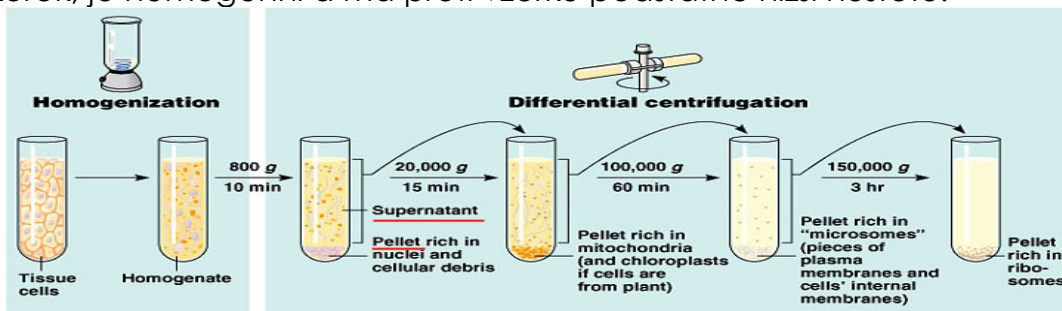
Používá se k separaci pevných částic od kapalně směsi, získáme tak zaprvé sediment (pelleta, pevná fáze) a za druhé supernatant (kapalná fáze).



Obr. 3 ukázka preparativní sedimentace [2]

Diferenciální centrifugace (frakční)

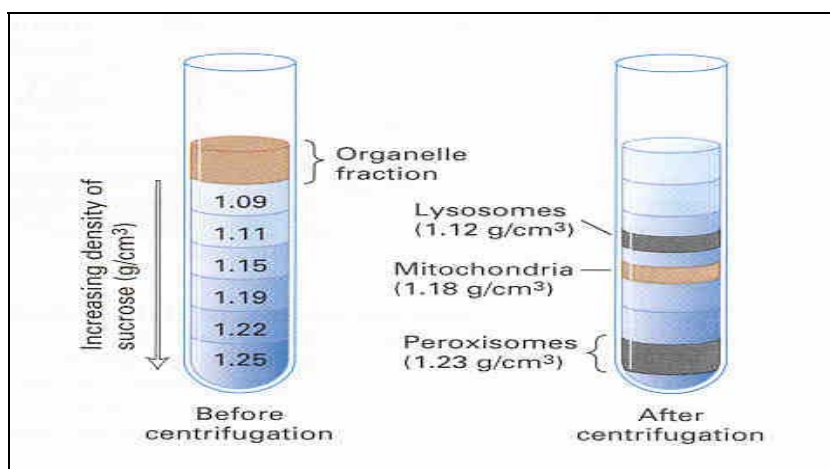
Jedná se o zvláštní typ preparativní centrifugace využívající odlišnosti ve velikosti jednotlivých buněčných organel. Opakovaně se odděluje kapalná fáze roztoku a je vystavována větší rychlosti, díky tomuto procesu získáváme různé frakce buněčných organel. Roztok, v kterém je vzorek, je homogenní a má proti vzorku podstatně nižší hustotu.



Obrázek 4 - názorná ukázka diferenciální centrifugace [2]

Gradientová centrifugace

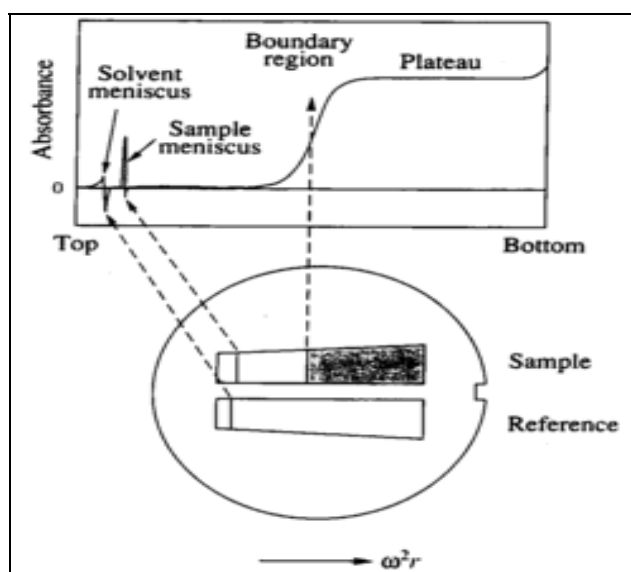
Jedná se o metodu využívající sedimentační rovnováhu v hustotním gradientu (měnící hustota média), který se vytváří pomocí roztoků inertních látek o vysoké hustotě např. CsCl , Cs_2SO_4 , nebo sacharosy. Hustotní gradient může být kontinuální (plynulá změna hustoty), či diskontinuální (skokové změny hustoty). V okamžiku vytvoření hustotního gradientu se složky zkoumaného vzorku přesouvají do míst roztoku se stejnou hustotou, nebo mezi vrstvy různých hustot. Separace vzorku probíhá na základě různých hustot nezávisle na velikosti a tvaru, přičemž nastává rovnovážný stav. Tato metoda probíhá za malých rychlostí, a je časově náročná.



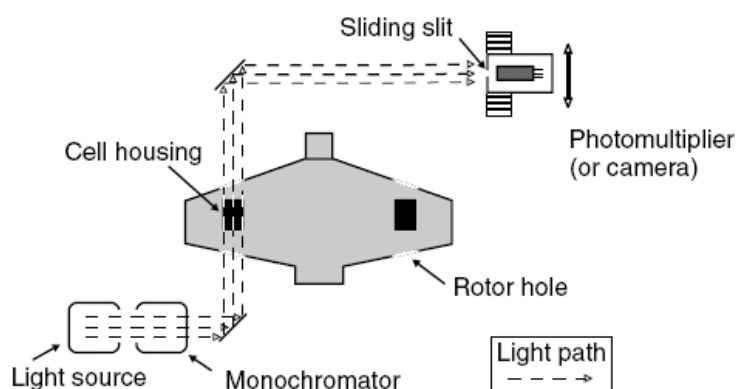
Obrázek 5 – případ diskontinuálního gradientu[1]

2.1.2 Analytická centrifugace

Využívá se k měření fyzikálních vlastností sedimentujících částic, kdy v průběhu centrifugace dochází ke sledování vzorku optickým systémem (spektrofotometrem nebo difraktometrem). Využívá se speciální modifikované, spektrofotometrické kyvety určené pro analytickou centrifugaci, jenž má dvě části určené pro referenční roztok a zkoumaný vzorek (viz Obr. 6 a 7). Teoretické základy této metody položil ve 20. letech 20. století Theodor Svedberg po němž je pojmenovaná jednotka sedimentačního koeficientu.



Obr.6 [1]



Obr.7 [3]

2.2 Centrifugy

Centrifuga je obecně zařízení skládající se z rotorového prostoru, pohonné jednotky, a řídicí jednotky. Rotorový prostor je vymezen ochranným štítem ochraňujícím lidskou obsluhu, pohonnou a řídicí jednotku při neplánovaném poškození kyvety, dle typu zařízení jsou zde výdechy umožňující ohřev a chlazení diagnostikovaných vzorků. Rotorový prostor bývá zabezpečen proti otevření za chodu přístroje. Konstrukce laboratorních centrifug musí umožňovat snadnou údržbu, jelikož se předpokládá práce s biologickým materiálem. Pohonná jednotka se skládá ze samotného motoru, či s kombinace motoru s převodovým ústrojím. Řídicí jednotka je reprezentovaná ovládacím panelem, který umožňuje vybrat a nastavit programy chodu zařízení (momentové charakteristiky, teplotu, pracovní časy operací), u sofistikovaných centrifug bývají součástí sběrnice sbírající data z optických systému umožňující průběžné vyhodnocování zkoumaného vzorku za pomoci softwarového vybavení PC, s možností dálkového regulování otáček a teploty.

2.2.1 Rozdělení centrifug

Dle RCF :

- Běžné laboratorní centrifugy** - až 10 000g
 - pro obvyklá vyšetření (např. separaci krevní plazmy)
- Vysokorychlostní centrifugy** – až 50 000g
 - pro separaci DNA
- Ultracentrifugy** – až 500 000g
 - využívá se vakua kvůli snížení odporu vzduchu a tím vzniku tepla
 - k separaci virů a makromolekul

Dle velikosti

- Stolní centrifugy** – zpracovávají objemy v řádech mililitrů
- Sálové centrifugy**- zpracovávají objemy v řádech stovek mililitrů až litrů

Dle rotoru (účelu)

Pracovním nástrojem centrifugy je rotor. Jedná se o mechanicky velice namáhanou součást, která pracuje ve vysokých otáčkách, a tudíž je nutné zajistit vyvážení rotoru. Existují různá konstrukční řešení vyhovující požadovaným účelům centrifugace. Univerzálnosti zařízení někteří dnešní výrobci dosahují možností výměny typu rotoru.

Typy rotorů:

Rotor s pevným úhlem

Používají se, jak pro diferenciální centrifugaci, kde dosahují kratší potřebné doby centrifugace, tak pro centrifugaci v gradientu hustoty. Kyveta by měla být zajištěná proti možnému vytečení. Bývají většinou masivní konstrukce a umožňují dosáhnout vyššího počtu otáček a zkoumat větší objemy vzorků. Na obrázcích 8 a 9 jsou zobrazeny příklady rotorů s pevným úhlem.



Obr.8 [1]



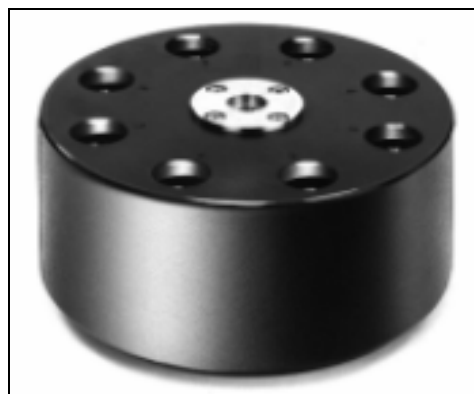
Obr.9 [1]

Výkyvný rotor

Dutina se působením odstředivé síly, natáčí do horizontální polohy ideální pro sedimentaci v hustotním gradientu, kde dochází k lepší separaci vzorku. Hustotní gradient se v průběhu centrifugace nemění. Hodí se pro nižší rychlosti a menší objemy vzorků, vzhledem k namáhání výkyvné části rotoru ukázka na Obr.10.



Obr.10 [3]



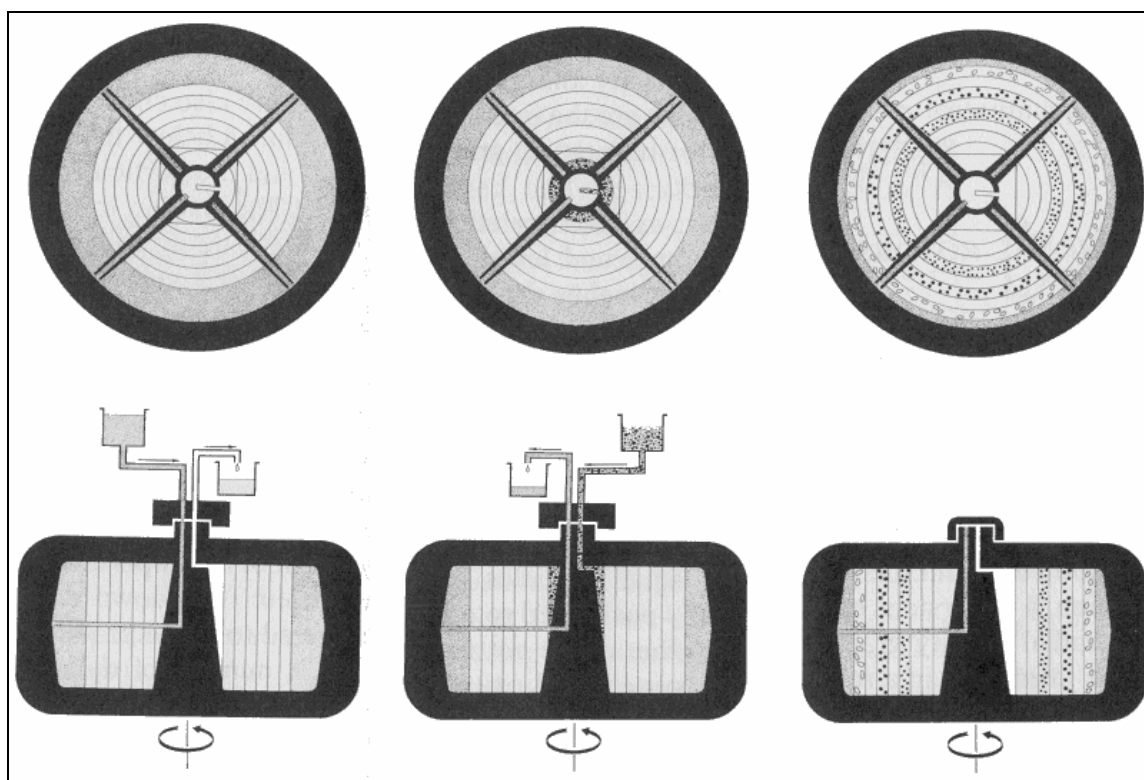
Obr.11 [1]

Vertikální rotor

Kyvety jsou umístěny paralelně vůči ose rotace (viz Obr.11), toto uspořádání má výhodu krátké sedimentační dráhy, která v důsledku snižuje pracovní čas centrifugy. V průběhu gradientové centrifugace se mění orientace hustotního gradientu.

Zonální rotor

Výhodné použití gradientové centrifugace umožňující centrifugaci velkých objemů vzorku (buněčné kultury). Pro vzorek se využívá celá dutina rotoru, která se vyprazdňuje i plní za běhu kanálky rotoru díky čemuž se zabráňuje promíchání hustotního gradientu. Princip je pro větší přehlednost názorně ukázán na následujícím obrázku (Obr.12).

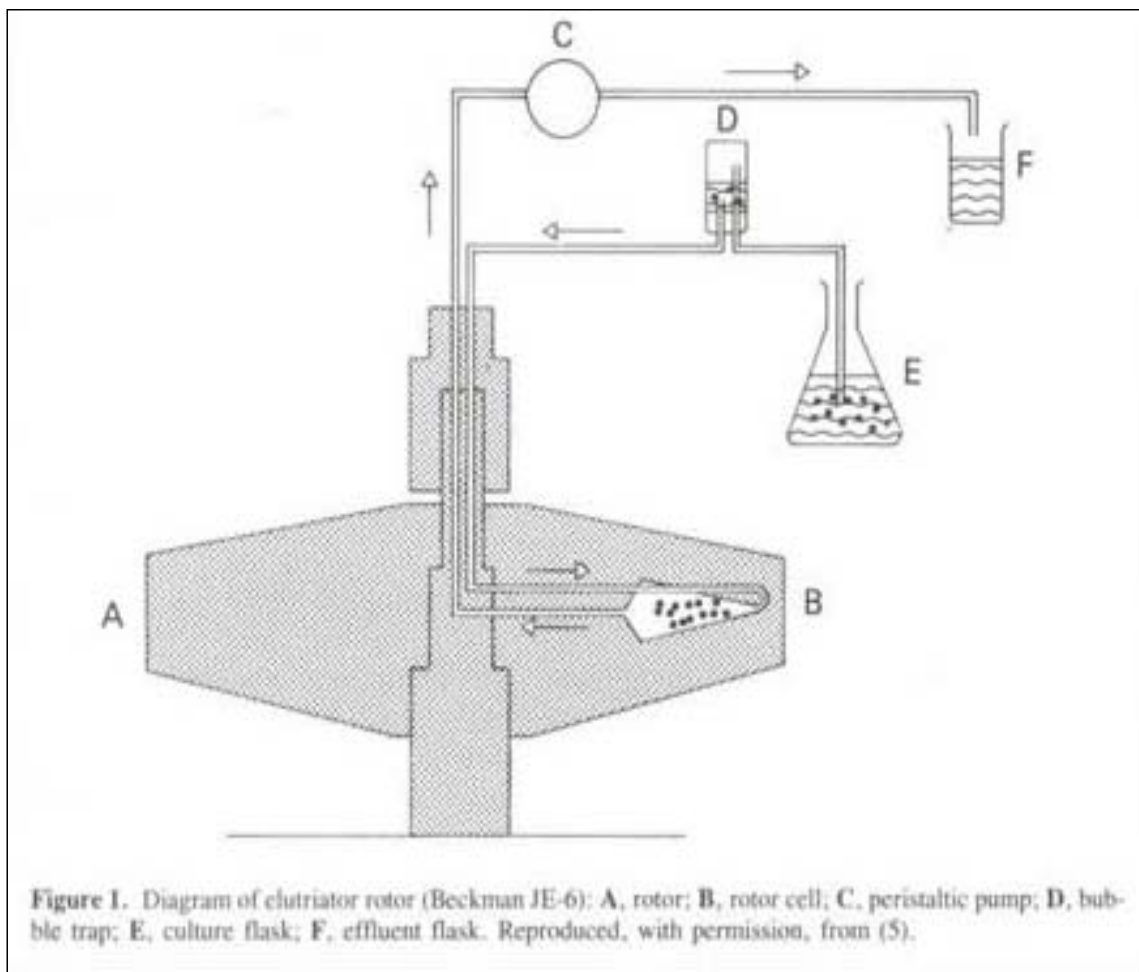


Obr.12 [1]

Elutriátor

Jedná se o speciální typ průtokového rotoru s konickým separačním prostorem, do kterého je vháněna směs vzorku s médiem proti směru sedimentace částic, tak vytváří průtokový gradient rychlosti a částice se zastavují v místech vyrovnaní průtokové rychlosti s rychlostí sedimentační,

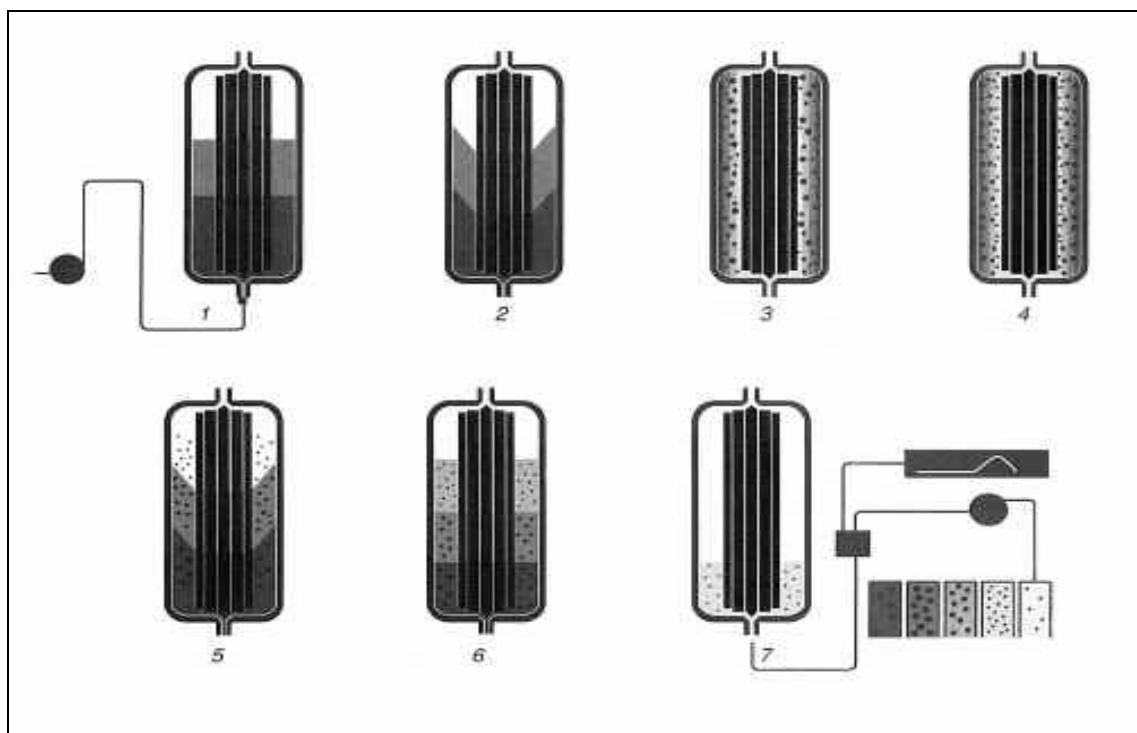
důsledkem toho částice nesedimentují u stěny zkumavky. Princip zobrazen na Obr.13.



Obr.13 Schéma elutriátoru [1]

Reograd

Fungují na obdobném principu jako rotory vertikální svým konstrukčním řešením se však podobají rotorům zonálním. Proti zonálním rotorům probíhá plnění a vyprazdňování staticky zrychlování začíná až po naplnění. Zrychlování i zpomalování probíhá pomalu, neboť se pracuje s hustotním gradientem a zabraňuje se tak promíchání gradientů při posunutém rozběhu.



Obr.14 [1]

3. Návrh konstrukce rotoru

Vlastní konstrukce rotoru byla ovlivněna požadavkem na vývoj stolní centrifugy pro molekulární diagnostiku, jenž byl podložen marketingovým průzkumem, a který by měl za pomoci vyvíjené více segmentové zkumavky automatizovat diagnostický proces. Geometrie rotoru s pevným úhlem byla vyvíjena s ohledem na geometrii vlastní zkumavky, její funkční segmenty, dostatečný počet pozic pro zkumavky, snahou minimalizovat moment setrvačnosti, pevnostní odolnost vůči předpokládanému fyzikálnímu zatížení a technologii odlévání. Téma bakalářské práce má nabídnout jedno z možných konstrukčních řešení rotoru prototypu přístroje v rámci týmu pracujícím na tomto projektu.

3.1 Pracovní cyklus rotoru

Definuje fyzikální zatížení rotoru z hlediska návrhu konstrukce a je směrodatný pro pevnostní kontrolu. Ze strany molekulárních biologů spolupracujících na tomto projektu byla požadována maximální RCF v definovaném bodě zkumavky 5000g, to určuje při definovaném poloměru otáčky rotoru, dále pak maximální teplota 70°C. Tyto parametry tvoří maximální a tudíž kritické zatěžující vlivy, které jsou určující pro pevnostní kontrolu rotoru a následně je využita při definování výpočtu za použití metody konečných prvků v prostředí Pro/Mechanica.

3.2 Geometrie rotoru

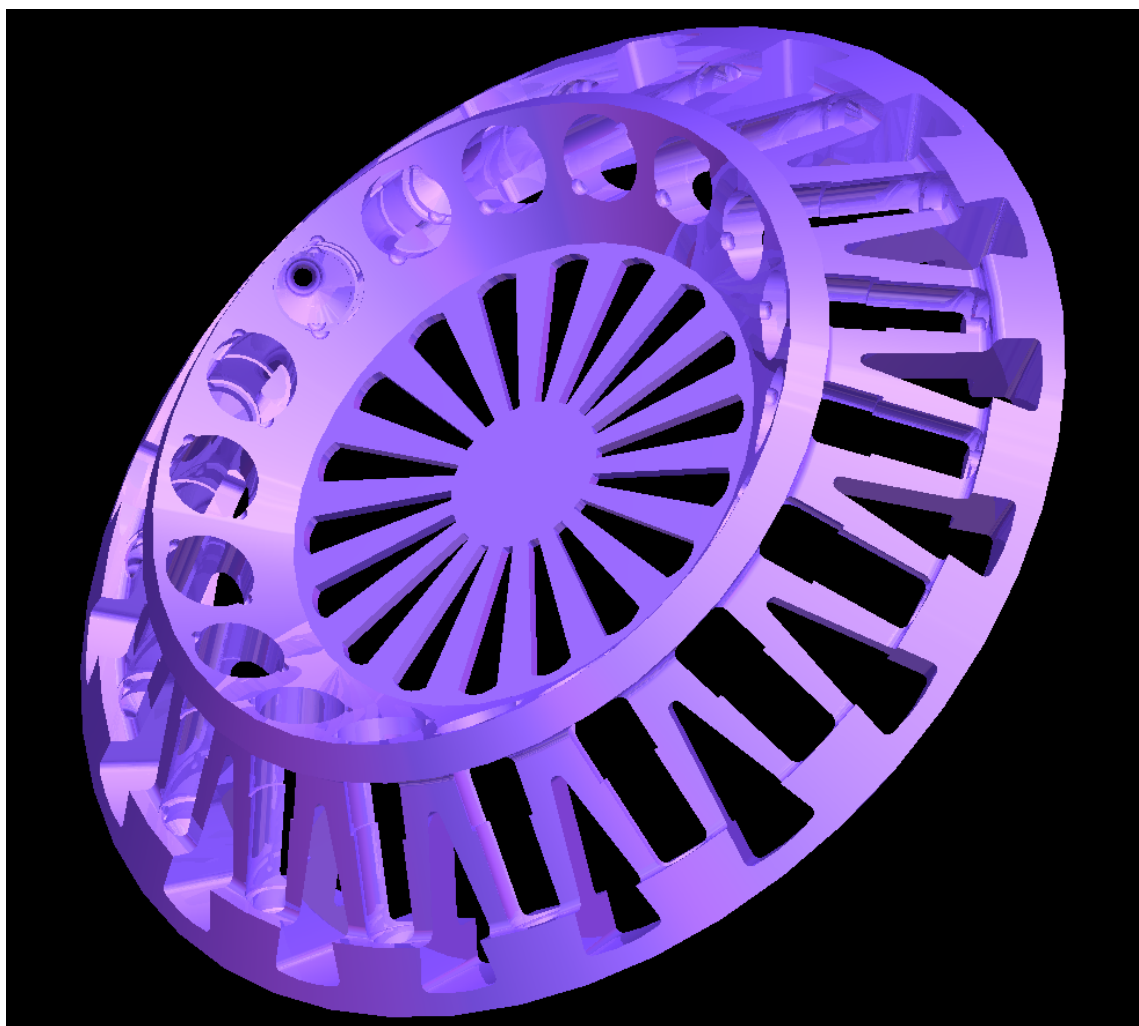
Jak bylo zmíněno, jedná se o rotor s pevným úhlem uložení kyvety, který dle zadání má svírat s osou rotace úhel 45°, z hlediska kompromisu rovnoměrného rozložení kyvet, velikosti rotoru a přiměřeně nízkých otáček byla zvolena vzdálenost definovaného bodu zkumavky od osy rotace $L = 114,4\text{mm}$. Díky této vzdálenosti referenčního bodu zkumavky bude umístěno na rotoru rovnoměrně 18 kyvet.



Obr.15 Schématické zobrazení kyvety

Pro zvolený bod referenční bod odstředění byl vymodelován rotor, jehož mechanické chování bylo následně prověřováno pevnostními výpočty, a zkoumali se vlivy jednotlivých geometrických úprav na změny napětí. Vzhledem k předpokládanému využití technologie odlévání bylo možné vytvořit tvarově složitější rotor. Slévárenská forma díky tvarové složitosti bude vyráběna technologií spalitelného modelu.

Jak je z Obr.15 patrné kyveta je složená z několika částí, které mají svůj funkční význam a ovlivňují konstrukci rotoru. Pro návrh rotoru je rozhodující ponechat volný konec kyvety a volnou střední část pro ohřev. Průměr kyvety se v jednotlivých částech mění, část 1 a část 3 je osazena pery, které definují přesnou a pro obsluhu jedinou možnost správného vložení a přispívají ke stabilitě zkumavky v průběhu centrifugace.

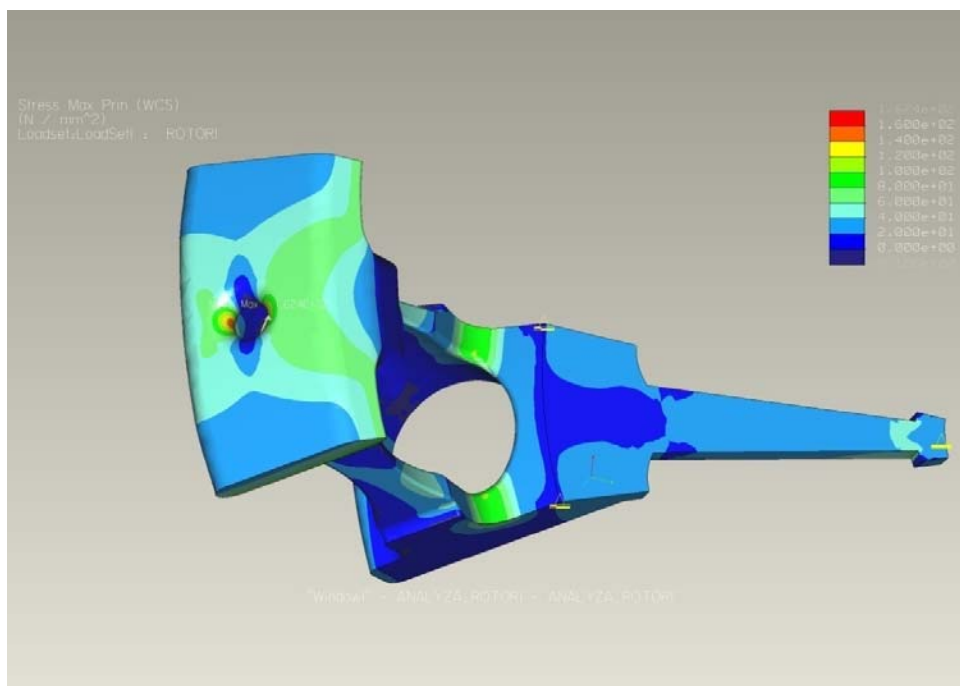


Obr. 16 Prvotní návrh geometrie rotoru

3.3 Pevnostní analýza rotoru

Odezvy pevnostních výpočtů v programovém prostředí Pro/Mechanika za pomoci metody konečných prvků byli klíčovou složkou vývoje takto vysoce mechanicky namáhané součásti. Díky vysokému výpočtovému výkonu pracovních stanic, mohl být proveden velký počet analýz, zjišťujících vliv konstrukčních úprav na změny napětí. Díky vyhodnocování výsledků analýz bylo umožněno snižování hmotnosti rotoru. K provádění výpočtu byla potřebná čistota modelu a úprava geometrie za účelem odstraňování singularit. V místech výskytu vyšších napětí byla zhušťována síť zvyšující přesnost výsledků v dané oblasti. Kvůli urychlení výpočtové odezvy byla využita metoda Single Pass. Zatížení bylo definováno úhlovou rychlostí v závislosti na působení $RCF = 7500g$ v referenčním bodě kyvety, které zajišťuje dostatečnou rezervu pro pnutí vzniklé vlivem teplotních změn a zvýšením napětí váhou kyvety se zkoumaným vzorkem a chemickými činidly.

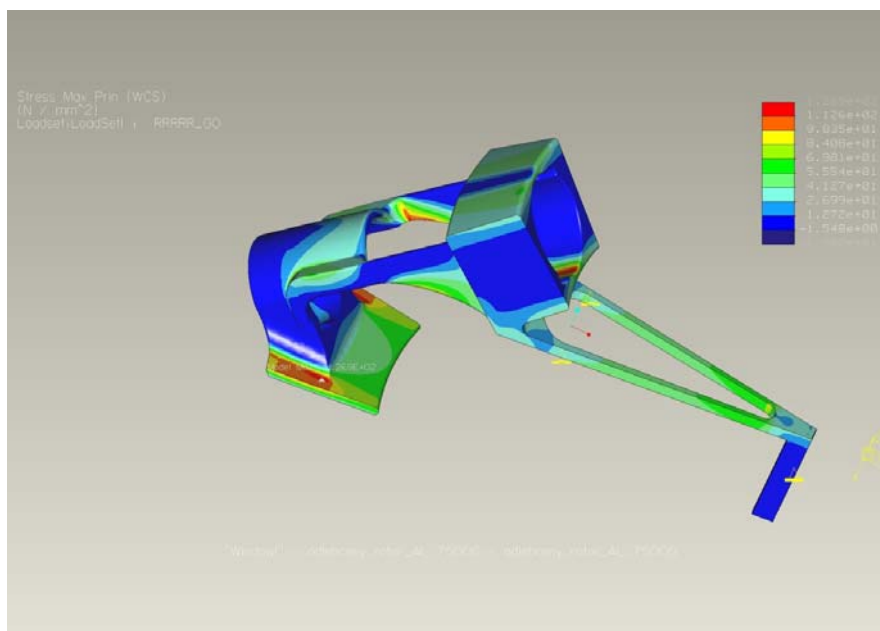
Ve výpočtové analýze byl definován jako materiál hliník určený pro odlévání z materiálové knihovny programu Pro/Engineer. Analyzována byla symetrická výseč rotoru. Redukované napětí dosahovalo vždy nižší hodnoty, než-li napětí tahové, proto nebylo ve vizualizacích zobrazeno.



Obr. 17

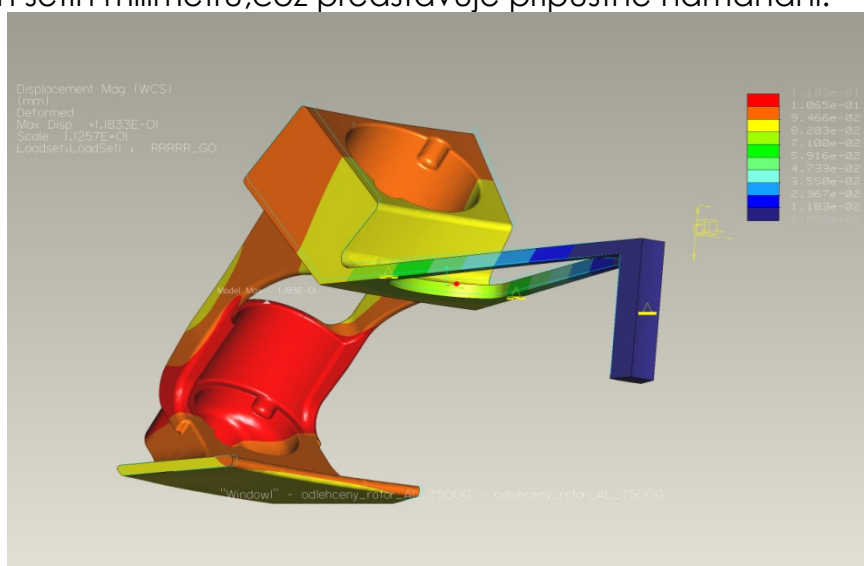
Na Obr.17 je vidět rozvinutá varianta prvotního návrhu rotoru, kde je obvodové žebro skloněno pod úhlem 45° vůči ose rotace. V této variantě se napětí koncentrovalo v otvoru pro nos kyvety a dosahovalo maximální hodnoty cca 163MPa. Tento konstrukční mezikrok měl, však malou plochu, kterou podpíral zkumavku. Postupnými úpravami

geometrie byla zjištěna souvislost mezi výskytem koncentrace napětí v otvoru pro nos náklonem obvodového žebra a jeho šířkou. Obvodové žebro v horizontální pozici zvýšilo tuhost rotoru, zároveň byl odstraněn přebytečný materiál. Tím se docílilo snížení maximálního tahového napětí v konečné verzi rotoru na hodnotu 127MPa a jeho koncentrace se přesunula na zaoblení spojující obvodové žebro s částí držící kyvetu.



Obr. 18

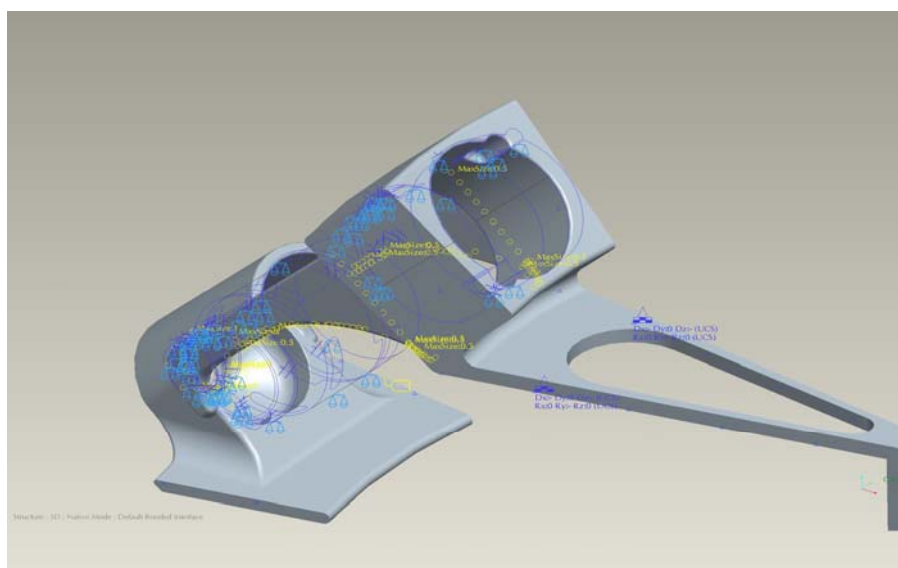
Mezi kvalitativní vlastnosti pevnostně optimalizované verze geometrie rotoru patří i malý rozdíl absolutního posunutí vrchní a spodní části rotoru. Vzhledem k faktu, že je zkumavka v průběhu centrifugace přitlačena ke stěně opěrných ploch, je rozdílným posuvem namáhána na ohyb. Na Obr.19 je vidět, že spodní a horní opěrná plocha je od sebe posunuta v řádech setin milimetrů, což představuje přípustné namáhání.



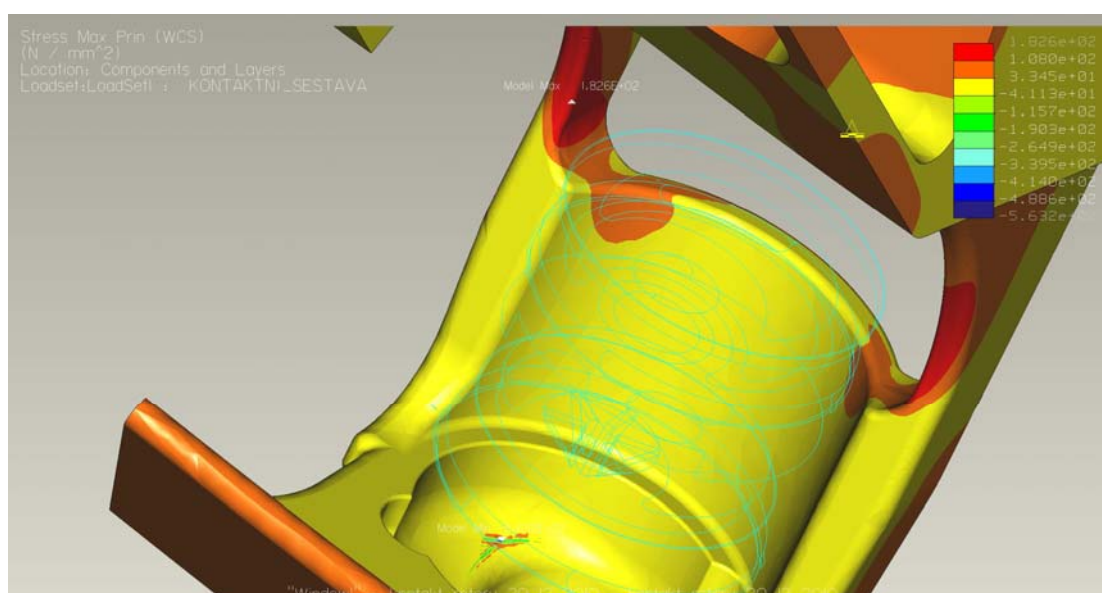
Obr.19

3.4 Kontaktní úloha

Provedením kontaktní úlohy rotoru s kyvetou se ověří únosnost rotoru a tím pádem jeho bezpečnost. Vůle pro snadné vložení kyvety je 1mm na průměr, to umožňuje malý pohyb kyvety a vznik kontaktního tlaku. Cílem bylo prověřit mechanickou odolnost rotoru, zdali v relativně malých kontaktních plochách nepřesáhne napětí na rotoru dovolené tahové napětí konstrukčního materiálu. Rozložení hmoty ve výpočtové zkumavce reprezentovalo kritický stav, kdy objem kapalin obsažených ve zkumavce bude soustředěn ve spodní a střední části zkumavky, a tím bude působit na rotor největší tahové namáhání.

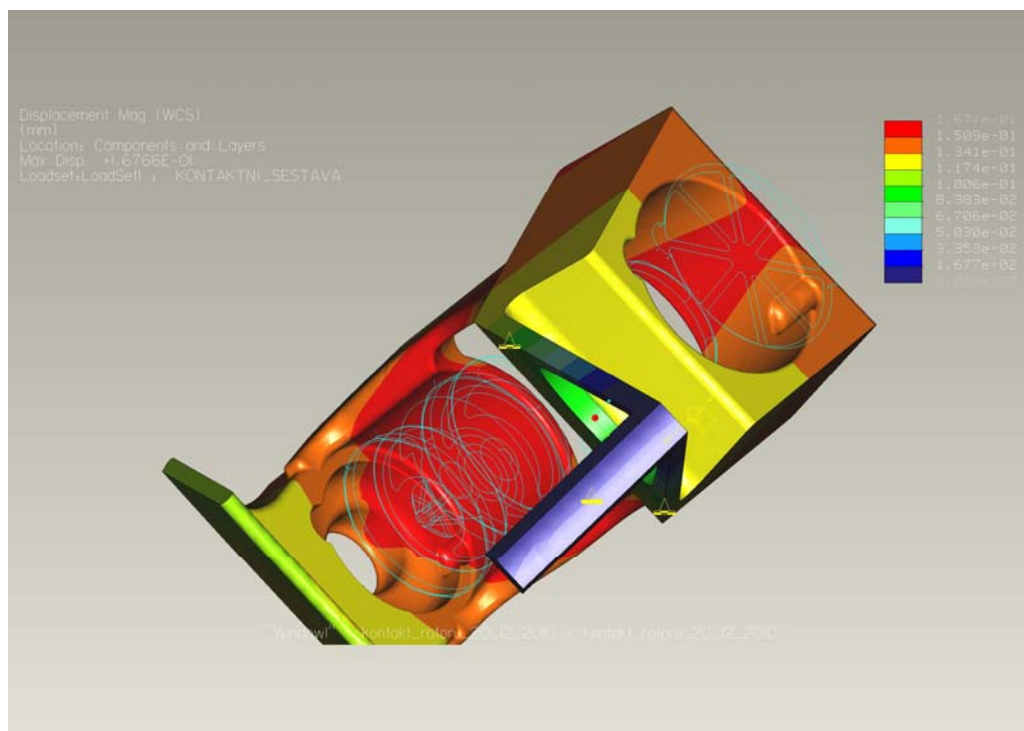


Obr.20



Obr.21

Na Obr.21 lze pozorovat špičku tahového napětí na žebro, držícím spodní opěrnou plochu pro zkumavky, ve výši 183MPa. Jedná se o nárůst o 56MPa oproti výpočtové verzi bez zkumavky. I tak je rezerva vůči maximálnímu dovolenému tahovému namáhání dostatečná. Na Obr.22 je zobrazeno posunutí na, kterém lze pozorovat nepatrný nárůst. Dobrým výsledkem bylo, že opěrné plochy, o které se kyveta v průběhu pracovního cyklu opírá, jsou nyní posunuty o necelých 0,02 mm.



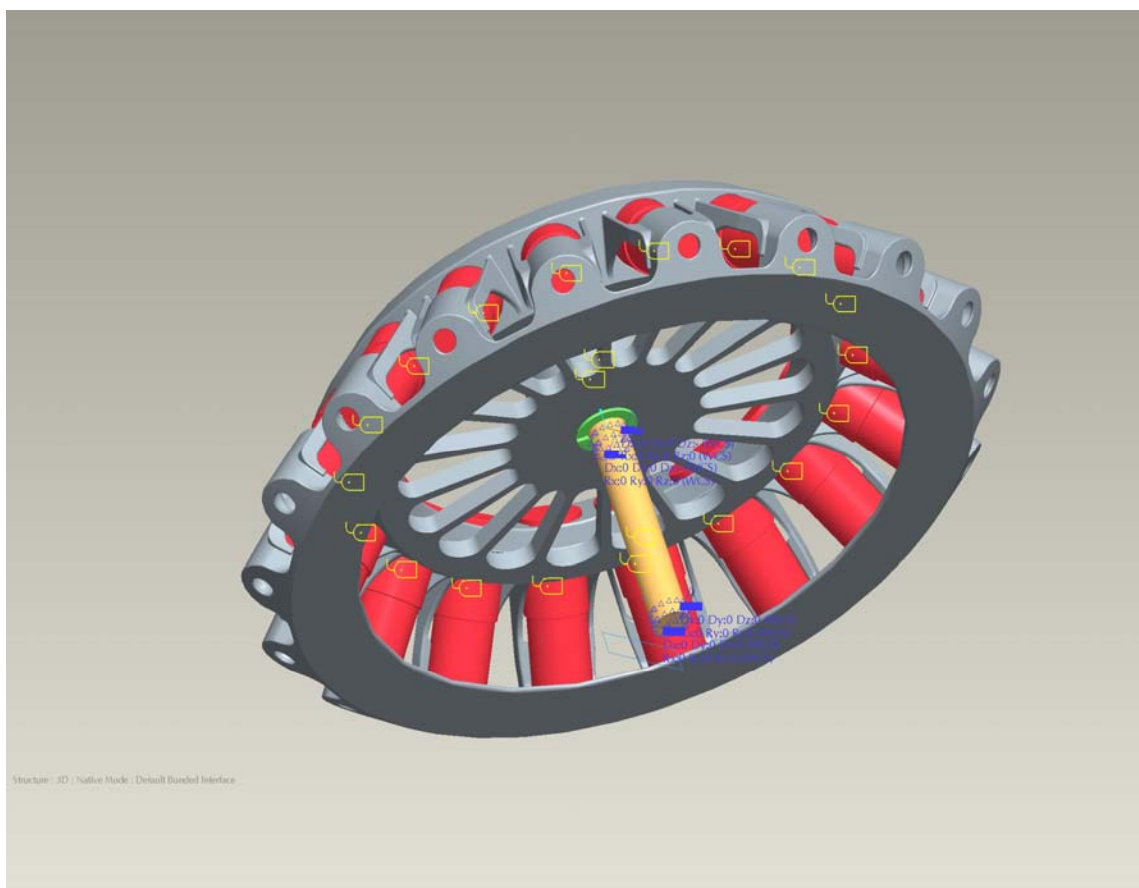
Obr.22

3.5 Modální analýza rotoru

Metodou konečných prvků lze získat řešení, jak statických, tak dynamických úloh. Mezi dynamickou úlohu řešitelnou pomocí metody konečných prvků patří určení vlastních frekvencí a tvarů konstrukcí. Pojmem vlastní tvar se vyjadřuje tvar tělesa, který nastane při dosažení vlastní frekvence. Za pomoci použití modální analýzy, lze získat vlastní frekvence těles a jejich soustav, pro jejich určení se ve výpočtu nezadává žádné vnější silové buzení. Znalost vlastních frekvencí je velice důležitá z pohledu konstruování strojních uzlů. V případě shody vlastní frekvence s frekvencí, ve které bude rotorová soustava pracovat, by docházelo k rezonanci, během níž by výchylka kmitání neúměrně vzrostla. Z těchto důvodů bylo provedení modální analýzy dalším logickým krokem synergického vývoje rotoru. Pro výpočet byla vymodelována rotorová soustava, která se skládala z rotoru, svěrného pouzdra, hřídele servomotoru a výpočtových kyvet, jejichž hmotnostní charakteristiky odpovídaly přibližně kyvetám skutečným.

3.5.1 Výpočtový model

Výpočtový model byl vytvořen pro navrhované uložení rotorové soustavy, která předpokládá uchycení rotoru přímo na hřídel motoru pomocí svěrného pouzdra. Ve výpočtové soustavě byl ponechán jeden stupeň volnosti okrajovými podmínkami, nahrazující ložiska motoru. Kvůli snížení těžiště soustavy rotoru, svěrného pouzdra a 18-ti kyvet byla pozměněna částečně geometrie. Prostor pro uchycení svěrného pouzdra se vůči zbytku rotoru přesunul po ose rotace směrem nahoru. Snížením těžiště rotorové soustavy se přibližuje těžiště blíže k ložiskům motoru, a tím se snižuje ohybové namáhání jeho hřídele způsobené ohybovým kmitáním, které lze předpokládat v případě nevyváženosti soustavy způsobené rozdílným naplněním kyvet diagnostikovaným vzorkem a chemickými činidly.



Obr. 23

3.5.2 Vlastní frekvence a tvary rotorové soustavy

Každá vlastní frekvence odpovídá frekvenci určitého volného kmitání. Mluvíme tak o kmitech ohybových, torzních a krouživých, či jejich kombinaci. Dle vztahu (3.1) pro vlastní frekvenci závisí její hodnota na tuhosti a hmotnosti.

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.1)$$

$$n_k = \frac{30\Omega}{\pi} \quad (3.2)$$

Z vlastní frekvence kmitů lze určit kritické otáčky hřídele viz. vztah (3.2), jenž nám pomáhá vyjádřit provozní otáčky, které by se měli pohybovat v rozmezí pro podkritický provoz do $0,8 n_k$ a nad kritický nad $1,3 n_k$.

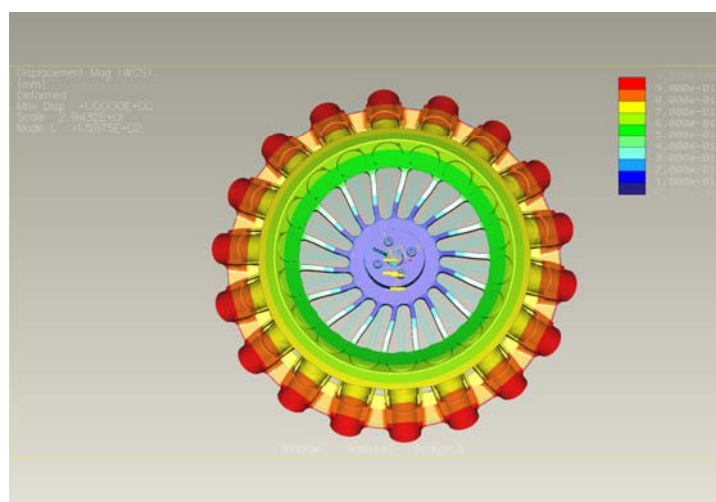
Tloušťka[mm]	1. Ω [Hz]	2. Ω [Hz]	3. Ω [Hz]	4. Ω [Hz]
2,5	45,3	59	96	793,3
5	79,6	105,8	239,4	797,6
6,5	159,8	171,7	418,5	804,4

Tab.1 Tabulka vlastních frekvencí v závislosti na tloušťce dna rotoru

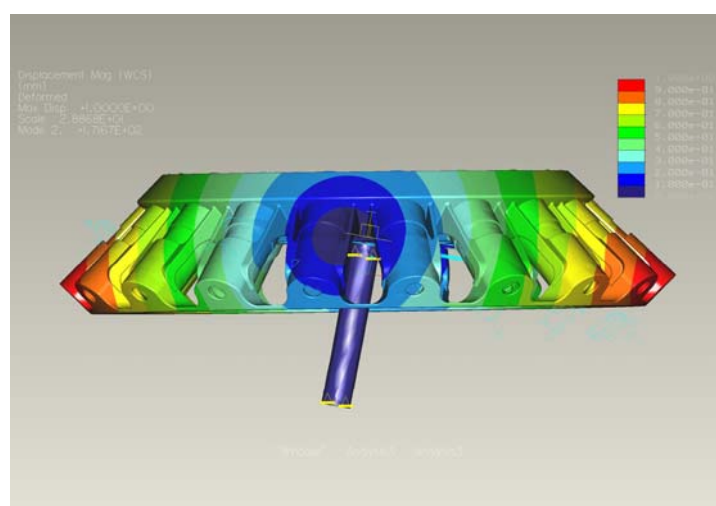
Z hlediska konstrukce rotoru či navrhování provozních otáček je nejdůležitější znalost první a druhé vlastní frekvence, jenž reprezentuje ohybový mod. Otáčky, v kterých bude rotor pracovat, budou proměnlivé a budou dosahovat hodnot od 0 do 6252 otáček za minutu, což představuje frekvence buzení od 0 do 104,2Hz. Z tohoto hlediska bylo snahou optimalizovat tvar součásti, tak aby se zvýšila jeho tuhost pro daný typ kmitání. Jako optimální se jevilo měnit tloušťku dna, které bylo díky snaze snižovat hmotnost rotoru na základě pevnostních analýz pouhých 2,5mm. Jak je vidět z Tab.1 postupnou změnou tloušťky dna se dosáhlo změny 1. vlastní frekvence rotorové soustavy, čímž bylo dosaženo podkritického provozu rotorové soustavy v celém spektru pracovních otáček.

Vlastní tvary vlastních frekvencí

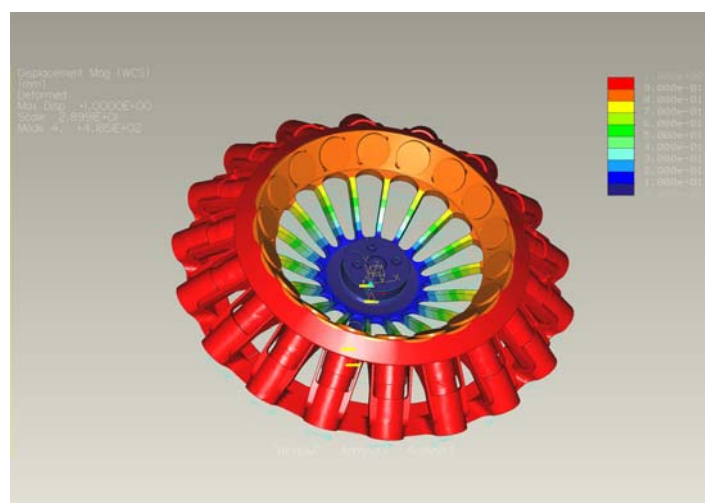
Pro názornou ukázkou je zobrazena vizualizace vlastních tvarů vlastních frekvencí po optimalizaci rotoru s tloušťkou dna 6,5mm. Z hlediska provozního zatížení je zobrazena vizualizace vlastního tvaru frekvence torzního a ohybového kmitání, což jsou první dvě vlastní frekvence a vlastní tvar kmitání ve směru osy rotace.



Obr.24 torzní mod 159,75Hz



Obr.25 ohybový mod 288,66Hz



Obr.26 axiální mod 418,51Hz

4. Návrh a výpočet pohonu přístroje

Volba pohonu byla ovlivněna postupným vývojem rotoru s neurčitostí výsledného momentu setrvačnosti rotorové soustavy. Z tohoto důvodu musel pohon kombinovat, jak vysoké provozní otáčky, tak velký točivý moment k rychlému překonání, v té době nezjištěných rezonančních oblastí, dále pak možnost přesného řízení polohy rotoru.

Zvolený motor

Zvolen byl servomotor značky CMC s označením MDM-5000 T0604, který díky svému výkonu 504W a možnosti krátkodobého přetížení představoval záruku předdimenzování pohonné jednotky, pro případné zvětšování momentu setrvačnosti způsobeného konstrukčními úpravami rotoru.

Kontrolní výpočet

Kontrolní výpočet času, za který se rozběhne motor na maximální otáčky pracovního cyklu, byl proveden za použití momentu setrvačnosti rotorové soustavy obsahující optimalizovaný rotor s 18-ti kyvetami, svěrného pouzdra a vlastního momentu setrvačnosti rotoru motoru. Hnací moment motoru, který se objevuje ve výpočtu, je nominální hodnotou uvedenou výrobcem pro 6916 otáček za minutu, což představuje minimální konstantní moment, jaký by motor dokázal vyvinout v průběhu celého pracovního cyklu rotorové soustavy. Pro kontrolní výpočet je tento údaj vyhovující.

n[ot./min]	0	384	768	1537	2305	3074	3842	4610	5379	6147	6916	7684
Mn [Nm]	1,35	1,34	1,32	1,28	1,24	1,18	1,12	1,04	0,95	0,84	0,71	0,54

Tab.2

Dáno:

$$I_{\text{celk.}} = 1,365912 \times 10^{-2} \text{kg.m}^2$$

$$M_{n \text{ min.}} = 0,71 \text{Nm}$$

$$\omega = 654,7 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\alpha = \frac{M_{n \text{ min.}}}{I_{\text{celk.}}} = 51,98 \text{rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.1)$$

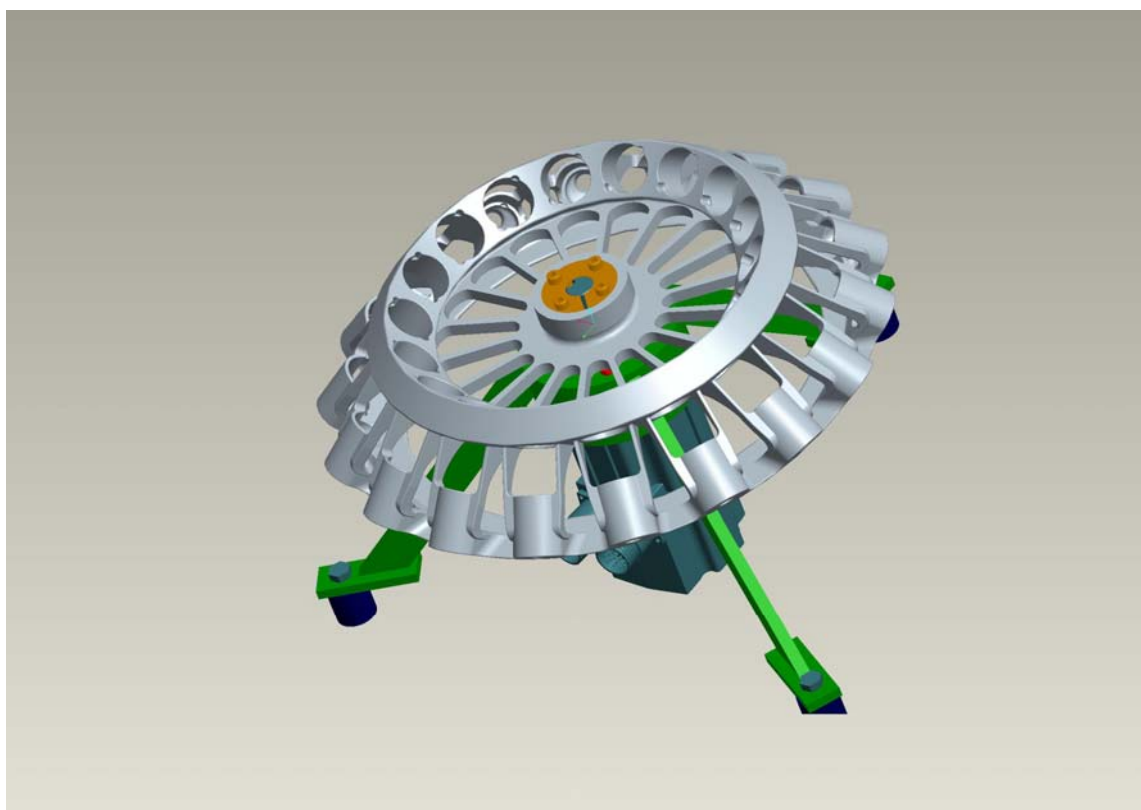
Pak

$$t = \frac{\omega}{\alpha} = 12,6 \text{s} \quad (4.2)$$

Rotorová soustava tedy bude dle vztahu (4.2), uvedena do maximálních provozních otáček, při minimálním vytížení motoru za 12,6 sekundy.

5. Koncepce uložení rotorové soustavy

Koncept návrhu představuje možnost řešení uložení rotorové soustavy přichycené přírubou motoru k přírubě svařence a tohoto celku k rámu přes silentbloky. Je nutné zmínit, že se jedná o koncepci, která není z hlediska provozních dynamických účinků optimalizována. Dynamickou analýzou by došlo k návrhu optimálních tuhostí silentbloků, jak pro tlakové namáhání, tak pro střihové namáhání. Na následujícím obr.27 je zobrazen koncept uložení. Modální analýza odpovídala této koncepci uložení.



Obr.27 vizualizace uložení rotoru

6. Závěr

Snahou bakalářské práce bylo vytvořit pevnostně odolný rotor určený pro práci ve vysokém přetížení, s dostatečnou tuhostí, která zabraňuje nadměrnému namáhání kyvety. Vlastní konstrukce rotoru a popis simulací použitých k jeho vývoji tvoří hlavní náplň práce, a popisují synergický přístup navrhování rotoru. Z důvodu složitosti geometrie rotoru se předpokládá výroba formy pro odlevání rotoru za využití technologie spalitelného modelu, který je vhodný pro kusovou výrobu, díky čemuž nebylo nutné vytvořit jeho výrobní výkres. Z hlediska pohonné jednotky byl zvolen motor s dostatečnou výkonovou rezervou a byla navržena koncepce uložení části zařízení.

Použitá literatura

[1] [PPT] Lecture_2.ppt

URL: http://mat.skola-biotechnologie.cz/2007/VIII.workshop/Lecture_2.ppt

[2] [PPT] Snímek 1

URL: <http://is.cuni.cz/studium/predmety/index.php?do=down&did=8932>

[3] [PDF] 2 prednaska

URL: <http://biomikro.vscht.cz/isolacebmm/prednaska2.pdf>

[4] Leinveber J., Vávra P.: Strojnické tabulky ISBN 80-7361-033-7

[5] Pešík L. : Části strojů 2. díl ISBN 978-80-7372-574-7

Webové stránky:

<http://www.cmccontrols.com/>

<http://www.uzimex.cz/>

Seznam příloh

Výkres sestavy	[B030/0.2]
Výkres svařence	[B030/1.3]
Výkres nožky	[B030/1-1.4]
Výkres patky	[B030/1-2.4]
Výkres objímky	[B030/1-3.4]

